ISSN 0203-2864

МИНИСТЕРСТВО ПРОМЫШЛЕННОСТИ СТРОИТЕЛЬНЫХ МАТЕРИАЛОВ СССР



ВСЕСОЮЗНЫЙ НАУЧНО-ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ ИНСТИТУТ НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКОЙ ИНФОРМАЦИИ И ЭКОНОМИКИ ПРОМЫШЛЕННОСТИ СТРОИТЕЛЬНЫХ МАТЕРИАЛОВ

ПРОМЫШЛЕННОСТЬ СТРОИТЕЛЬНЫХ МАТЕРИАЛОВ

Серия 8

ПРОМЫШЛЕННОСТЬ АВТОКЛАВНЫХ МАТЕРИАЛОВ И МЕСТНЫХ ВЯЖУЩИХ

Обзорная информация

Выпуск 2

НОВЫЕ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ РЕШЕНИЯ В ПРОИЗВОДСТВЕ ЯЧЕИСТЫХ БЕТОНОВ

МОСКВА 1982

УДК 666.965.2-405.8

Авторы: д-р техн.наук МЕРКИН А.П., канд.техн.наук ЗЕЙФМАН М.И.

В обзоре изложены технологические приемы повышения прочности и снижения средней плотности автоклавных ячеистых бетонов, мероприятия, направленные на уменьшение энергоемкости производства и повышение эффективности их применения. Рассмотрены возможности повышения трещиностойкости ячеистобетонных изделий в процессе производства и эксплуатации, а также использования вторичных продуктов и отходов промышленности в производстве ячеистых бетонов.

Обзор предназначен для инженерно-технических работников предприятий, специалистов научно-исследовательских и проектных институтов, принимающих участие в разработке целевых комплексных программ по ячеистым бетонам.

Научный редактор канд.техн.наук Г.В.КРАСНОВА

МИНИСТЕРСТВО ПРОМЫШЛЕННОСТИ СТРОИТЕЛЬНЫХ МАТЕРИАЛОВ СССР



ВСЕСОЮЗНЫЙ НАУЧНО-ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ ИНСТИТУТ НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКОЙ ИНФОРМАЦИИ И ЭКОНОМИКИ ПРОМЫШЛЕННОСТИ СТРОИТЕЛЬНЫХ МАТЕРИАЛОВ

ПРОМЫШЛЕННОСТЬ СТРОИТЕЛЬНЫХ МАТЕРИАЛОВ

Серия 8. ПРОМЫШЛЕННОСТЬ АВТОКЛАВНЫХ МАТЕРИАЛОВ И МЕСТНЫХ ВЯЖУЩИХ

Обзорная информация

НОВЫЕ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ РЕШЕНИЯ В ПРОИЗВОДСТВЕ ЯЧЕИСТЫХ БЕТОНОВ

Выпуск 2 Москва 1982

ВВЕДЕНИЕ

В постановлении ЦК КПСС и Совета Министров СССР "Об усилении работы по экономии и рациональному использованию сырьевых, топливно-энергетических и других материальных ресурсов" отмечается, что для успешного выполнения программы экономического и социального развития страны, принятой XXVI съездом КПСС, необходимо вовлечь в производство огромные объемы сырьевых, топливно-энергетических и других материальных ресурсов. Однако добыча сырья и топлива обходится все дороже, а запасы их невосполнимы. В этой связи важное народнохозяйственное значение приобретает экономичное и рациональное использование всех видов материальных ресурсов, в первую очередь топливно-энергетических.

Если рассматривать тепловую энергию как ценный продукт, то отапливаемые здания являются своего рода емкостями для хранения этого своеобразного продукта. Однако ограждающие поверхности этих емкостей очень часто невысокого качества, что приводит к значительным потерям тепла через них. В этой связи особую актуальность приобретают задачи увеличения производства и расширения области применения стеновых материалов с улучшенными теплоизоляционными характеристиками, например автоклавных ячеистых бетонов.

Многолетняя практика производства и применения автоклавных ячеистых бетонов показывает, что в основе их производства лежит энерго-

сберегающая технология, а по строительно-эксплуатационным показателям и теплозащитным характеристикам ячеистобетонные изделия и конструкции относятся к высокоэффективным [I]. Эксплуатационные преимущества домов из ячеистобетонных изделий не ограничиваются только экономией тепла на отопление. Стены из ячеистого бетона обладают высокой паропроницаемостью, что обеспечивает их быстрое высыхание и создает в помещении благоприятный микроклимат.

Автоклавная технология дает возможность для широкого применения различных промышленных отходов, позволяя практически полностью исключить из производства цемент и известь. Это создает основу для расширения сырьевой базы, снижения энергоемкости производства и себестоимости продукции, обеспечивая одновременно эффективное решение вопросов охраны окружающей среды [2]. Производство автоклавных ячеистых бетонов позволяет на основе единой технологии получать широкую номенклатуру изделий различного функционального назначения – от конструкционных объемной массой 900-I200 кг/м^3 до теплоизоляционных объемной массой 200-250 кг/м^3. Это является результатом эффективного сочетания в одном материале высоких строительных и эксплуатационных показателей, главным из которых является низкая теплопроводность.

В настоящее время имеется реальная возможность для улучшения строительно-эксплуатационных показателей ячеистого бетона, снижения энерго- и материалоемкости производства, повышения производительности труда за счет совершенствования технологии и отдельных технологических переделов. Рассмотрению научных основ и практических рекомендаций, направленных на повышение эффективности производства и улучшение качества ячеистобетонных изделий и конструкций, и посвящен настоящий обзор.

УЛУЧШЕНИЕ СТРОИТЕЛЬНО-ЭКСПЛУАТАЦИОННЫХ ПОКАЗАТЕЛЕЙ ЯЧЕИСТОБЕТОННЫХ ИЗДЕЛИЙ

Повышение эффективности производства и применения ячеистых бетонов основано на снижении их объемной массы при одновременном повышении физико-технических свойств. Результаты исследований, проведенных в научно-исследовательских институтах и высших учебных заведениях страны, а также опыт зарубежных фирм "Итонг", "Сипорекс", "Хебель", "Калсилокс" показывают, что в настоящее время имеются реальные возможности организовать на большинстве отечественных предприятий на базе существующей технологии производство ячеистобетонных изделий и конструкций объемной массой 500-550 кг/м^3 со строительно-эксплуатационными показателями, которые регламентированы для ячеистого бетона объемной массой 600-700 кг/м^3. Заслуживает внимания опыт ЧССР, где в результате пересмотра нормативных документов установлена одна величина максимальной средней объемной массы ячеистого бетона – не более 575 кг/м^3, и приняты новые марки по прочности на сжатие, для которых регламентированы значения теплопроводности [3].

Повышение качества ячеистых бетонов по показателям объемной массы (теплопроводности), прочности и трещиностойкости связано с разработкой и внедрением в производство улучшенных составов сырьевых композиций и технологических решений, обеспечивающих улучшение пористой структуры материала и повышение прочностных показателей силикатного камня (межпорового материала).

ПУТИ ПОВЫШЕНИЯ ПРОЧНОСТНЫХ ПОКАЗАТЕЛЕЙ И СНИЖЕНИЯ ОБЪЕМНОЙ МАССЫ ЯЧЕИСТОГО БЕТОНА

Искусственное получение силикатного камня предусматривает омоноличивание частиц кремнеземистого компонента цементирующими новообразованиями в процессе автоклавной обработки. При этом новообразования выполняют двоякую роль: активную, склеивая частицы кремнеземистого компонента, и пассивную, заполняя пустоты между ними. Поэтому химическая активность и межзерновая пустотность кремнеземистого компонента решающим образом влияют на состав сырьевой шихты, энергетические затраты на подготовку сырьевых материалов, продолжительность автоклавной обработки, качественный и количественный состав цементирующих новообразований.

Известно, что физико-технические показатели и долговечность ячеистобетонных изделий во многом зависят от качества структуры силикатного камня. Для ее оценки авторы предлагают использовать два показателя – степень омоноличенности структуры $n_о$ и вид цементации $n_ц$. Показатель $n_о$ характеризует количество цементирующего вещества, необходимое для склеивания частиц непрореагировавшего кремнеземистого компонента и заполнения его межзерновой пустотности. Величина показателя $n_о$ рассчитывается по формуле

$$n_0 = K \frac{C_H}{n \cdot c/s} \cdot e^{-\frac{A}{100}} ,$$

где К – коэффициент, характеризующий гомогенность сырьевой шихты. Принимается равным I при раздельном помоле компонентов и I,2 при совместном;

$C_н$ – концентрация цементирующих новообразований. Определяется расчетным путем по данным химического анализа или методами стереометрического анализа по ГОСТ 22023-76" "Материалы строительные. Метод микроскопического количественного анализа структуры";

C/S – основность синтезируемых новообразований. Определяется по результатам химического анализа;

$e^{-\frac{A}{100}}$ – показатель, учитывающий разрыхление исходной структуры при гидратации извести. A – процентное содержание активной CaO;

$П$ – пустотность кремнеземистого компонента в вибрированном (для вибрационной технологии) или в насыпном влажном состоянии (для литьевой технологии формования).

Между показателем n_o и прочностью на сжатие силикатного камня с послеавтоклавной влажностью $R^o_{сж}$, приведенной к γ_o = 1000 кг/м^3, существует зависимость

$$R^o_{сж} = \alpha \cdot R'_в (n_o - 0{,}5) ,$$

где α – коэффициент, характеризующий плотность цементирующего вещества и его когезию. При литьевой технологии формования принимается равным 0,9; при вибрационной – 1,0.

$R_в$ – прочность цементирующего вещества с послеавтоклавной влажностью, МПа.

В зависимости от фазового и морфологического состава новообразований величина $R_в$ составляет: при использовании смешанного вяжущего 40-50МПа, известково-песчаного вяжущего 40-60 МПа.

Вид цементации силикатного камня ячеистого бетона зависит от соотношения объемов цементирующего вещества и непрореагировавшего кремнеземистого компонента. В общем случае для структуры силикатного камня автоклавного твердения характерны три вида цементации: контактная – $n_ц \leq 0{,}6$; поровая – $0{,}6 < n_ц \leq 1{,}5$; базальтная – $n_ц > 1{,}5$. Показатель $n_ц$ равен отношению объема цементирующего вещества $V_{ц.в}$, пронизанного сетью капиллярных пор $V_{к.п}$, к объему непрореагировавшего кремнеземистого компонента $V_к$:

$$n_ц = \frac{V_{ц.в.} + V_{к.п}}{V_к} .$$

Величина $n_ц$ рассчитывается по следующей формуле

$$n_ц = \frac{\gamma_o^{т.ф.}}{\gamma_{уд}^{т.ф.}(1 - V_{к.п})(SiO_2^{общ} - SiO_2^{св})} - 1$$

где $\gamma_o^{т.ф.}$ – объемная масса силикатного камня, кг/м^3;

$\gamma_{уд}^{т.ф.}$ – плотность цементирующего вещества, кг/м^3;

$SiO_2^{общ}, SiO_2^{св}$ – соответственно доли общего и связанного в гидросиликаты кальция кремнеземистого компонента, определяемые по данным химического анализа.

Характер структуры силикатного камня, который можно оценить по показателю вида цементации, оказывает решающее влияние на трещиностойкость ячеистого бетона. Зависимость между коэффициентом трещиностойкости $K_{тр}$ и показателем вида цементации $n_ц$ имеет следующий вид:

$$K_{тр} = 1{,}28 \cdot n_ц^{-0{,}46} .$$

Получение конструктивно-теплоизоляционных ячеистых бетонов удовлетворительной трещиностойкости обеспечивается при формировании поровой структуры силикатного камня с $n_ц < 1{,}5$ и значении $n_o = 1{,}2 \div 1{,}3$. Эти условия обеспечиваются при использовании сырьевых композиций, содержащих кремнеземистый компонент пустотностью 25-30% и химической активностью 0,2-0,25 мг/г, которую оценивают по величине растворимости при заданной температуре автоклавной обработки. Наиболее полно этим требованиям отвечает грубомолотый песок удельной поверхностью 1200-1500см^2/г.

При производстве мелких ячеистобетонных блоков, теплоизоляционных и декоративно-акустических изделий, трещиностойкость которых не нормируется, наиболее целесообразно формирование силикатного камня базальтного вида цементации с показателем $n_o > 1{,}25$. В этом случае оправдано применение кремнеземистого компонента повышенной дисперсности и химической активности, способствующего повышению прочностных показателей силикатного камня. Этим требованиям отвечает кремнеземистый компонент дисперсностью выше 2000 см^2/г с высокой степенью аморфизации поверхности.

Из приведенных выше формул следует, что повышение прочностных показателей силикатного камня, а следовательно, и ячеистого бетона может быть достигнуто за счет:

- повышения гомогенности ячеистобетонной смеси (K);
- получения рационального состава цементирующих новообразований (C/S) путем регулирования химической активности компонентов сырьевой смеси и параметров автоклавной обработки;
- применения эффективных способов формования (α);
- оптимизации состава сырьевой смеси в зависимости от зернового состава кремнеземистого компонента и его химической активности.

Однако трудно ожидать, что какое-либо еще не проверенное соотношение компонентов сырьевой смеси может обеспечить резкое увеличение прочности ячеистого бетона, так как $n_{o\,max}$=2. По-видимому, это произойдет в том случае, если будет найден способ получения автоклавных вяжу-

щих высокой прочности ($R_в \geq 80$ МПа). Практически повышение прочностных показателей ячеистого бетона может быть обеспечено за счет разработки и внедрения новых вяжущих повышенной прочности, а также изменения характера напряженного состояния силикатной матрицы при введении в ячеистобетонную смесь добавок, обусловливающих появление в материале дополнительных структурных элементов.

В настоящее время при подготовке компонентов сырьевой смеси широко применяется технологическая схема, предусматривающая мокрый помол основной массы песка. Считалось, что такой способ более производителен и менее энергоемок. Однако проведенные в последние годы научно-теоретические исследования и новые технологические разработки, изменили сложившиеся представления о сравнительной экономичности подготовки сырьевых материалов сухим (совместный сухой помол) и мокрым способами. Установлено, что применение сухого способа подготовки компонентов сырьевой смеси позволяет увеличить на 15-20% прочностные показатели ячеистого бетона [3, 4, 5], снизить суммарную энергоемкость технологического процесса производства ячеистых бетонов примерно в 1,5 раза, уменьшить износ мелющих тел и футеровки мельницы на 60-70% [6, 7].

Улучшение прочностных показателей ячеистого бетона, полученного по сухому способу, связано с повышением гомогенности сырьевой шихты и протеканием в процессе совместного помола механо-химических реакций, что исключает "старение" вновь образованных химически активных поверхностей [3, 4, 6]. При применении смешанного вяжущего в процессе совместного сухого помола повышается активность цемента. Преимущества применения "сухого" способа убедительно подтверждаются опытом работы Воронежского завода ЖБИ-1 [6], а также предприятий, работающих по технологии фирмы "Калсилокс" [8].

Не менее важным преимуществом сухого способа является уменьшение износа мелющих тел и футеровки мельниц при помоле сырьевых материалов. На предприятиях нашей страны используются металлические мелющие тела, а в качестве футеровки – броневые плиты. Исследованиями по определению износа металла [9] установлено, что суммарный износ мелющих тел и футеровки мельниц при использовании мокрого способа подготовки кремнеземистого компонента составляет в среднем 1,19%. С учетом этих результатов и данных НИПИсиликатобетона [10] рассчитано, что ежегодный намол металла на заводах ячеистых бетонов составляет в среднем 40-42 тыс.т, или около 10% всего потребления металла в производстве стеновых материалов [1]. Следует подчеркнуть, что в данном случае имеют место не только невосполнимые потери металла, но и ухудшение свойств ячеистого бетона.

В этой связи заслуживает внимания опыт зарубежных фирм [8], которые помол песка осуществляют, как правило, в мельницах с резиновой футеровкой, а в качестве мелющих тел используют песчаник или кварциты с размером кусков 30-70 мм. Такой способ позволяет не только исключить намол металла, но и обеспечивает повышение химической активности кремнеземистого компонента по сравнению с помолом в мельнице с металлическими мелющими телами. Объясняется это высокой чистотой вновь образующихся при помоле поверхностей частиц песка, и, по-видимому, частичным износом высококремнеземистых мелющих тел, что приводит к появлению в шламе полностью аморфизованных частиц размером менее 2 мкм. Эти частицы благодаря своей высокой химической активности обеспечивают при автоклавной обработке повышение концентрации силикат-иона в жидкой фазе, что способствует улучшению качества цементирующих новообразований и повышению прочностных показателей ячеистого бетона.

Физико-технические свойства автоклавных ячеистых бетонов в значительной мере определяются качеством структуры цементирующего вещества, которая при установившихся в настоящее время параметрах автоклавной обработки (СН 277-80) зависит в основном от состава сырьевой шихты и химической активности кремнеземистого компонента. В этом плане практический интерес представляют пути улучшения качества структуры цементирующего вещества за счет применения добавок химически активных соединений алюминия, хлора, щелочных металлов и солей серной кислоты [11]. При использовании этих добавок возникают цементирующие новообразования сложного состава с повышенной степенью конденсации кремнекислородных анионов и преобладанием в структуре связи ковалентного типа, что позволяет повысить прочностные и эксплуатационные показатели ячеистого бетона.

Примером может служить разработанный Воронежским инженерно-строительным институтом состав сырьевой шихты [12], содержащей в известково-шлако-песчаном вяжущем (активность 20-21%) 10,2 - 15,8 мас.% граншлака (активность 0,2, модуль основности 1,04), 2,4-3,5 мас.% полуводного гипса, 1,5-1,9 мас.% хлористого натрия. Из сырьевой смеси такого состава, полученной путем совместного сухого помола компонентов, приготовлен ячеистый бетон марки 35 объемной массой 550 кг/м^3. При этом предел прочности на растяжение при изгибе увеличился в 1,5 раза, влажностная усадка снизилась в 1,7-2 раза.

Механизм и кинетика процессов формирования структуры цементирующего вещества автоклавных материалов решающим образом зависят от химической активности кремнеземистого компонента, определяющей его растворимость в гидротермальных условиях и концентрацию в растворе силикат-иона. С целью увеличения в растворе концентрации силикат-иона помимо широко

известных технологических приемов повышения температуры автоклавной обработки или дисперсности песка рекомендуется [II, I3] применение химических добавок, обеспечивающих повышение pH среды (щелочи или несиликатные соли щелочных металлов слабых кислот) или склонных к комплексообразованию (хлориды, фториды).

Особенно эффективно применение тонкодисперсных добавок природных или техногенных стекол: перлита, обсидиана, спонголитов, вулканических туфов, природных шлаков, гранулированных шлаков, боя тарного, оконного или технического стекла и т.п. Введение их в сырьевую смесь в количестве I0-I5% совместно с добавкой гипса в количестве 2-3% от массы сухих компонентов смеси обеспечивает повышение pH среды и концентрацию силикат-иона в жидкой фазе за счет гидролитической деструкции иоходной структуры стекла. Благодаря этому улучшается фазовый и морфологический состав цементирующих новообразований, которые в основной своей массе представлены низкоосновными гидросиликатами кальция, алюминийзамещенным тоберморитом, гидрогранатами и щелочными гидроалюмосиликатами. В результате при той же объемной массе прочность ячеистого бетона на сжатие увеличивается на I5-20%, на растяжение - на 30-50%.

Не менее эффективно применение химически активной кремнеземистой добавки, содержащей 95-97% SiO_2 в некристаллической форме с размером частиц менее I мкм [I4], или добавки тонкомолотого песка удельной поверхностью 4000-5000 см^2/г. Расход и дисперсность добавки в зависимости от активности сырьевой смеси, дисперсности песка и режима автоклавной обработки определяется по методике МИСИ им.В.В.Куйбышева [I5]. Применение химически активной кремнеземистой добавки наиболее целесообразно на заводах, использующих некондиционное кремнеземистое сырье или пески полиминерального состава с повышенным содержанием илистых, глинистых и других примесей, не удовлетворяющие требованиям ГОСТ 8736-77.

Снижение объемной массы ячеистых бетонов и одновременно увеличение его прочностных показателей должно,в первую очередь,сопровождаться увеличением прочности материала на растяжение. Это обусловлено требованиями СНиП П-2I-75, согласно которым основным параметром при расчете конструкций на трещиностойкость является прочность ячеистого бетона на растяжение. Поэтому повышение прочности ячеистого бетона на растяжение позволяет не только улучшить его эксплуатационные показатели, но и принимать при проектировании конструкций и сооружений более экономичные решения. Наиболее эффективным технологическим приемом повышения прочности ячеистого бетона на растяжение является дисперсное армирование силикатного камня волокнистыми добавками. Оно позволяет активно влиять на характер напряженного состояния матрицы ячеистого бетона при прило-

жении нагрузок и за счет перераспределения напряжений тормозить процессы развития трещин и разрушения материала.

Исследования НИИЖБа [I6] показали, что дисперсное армирование ячеистого бетона низкосортным асбестом в количестве 3-5% или щелочестойким волокном в количестве 4-8% от массы сухой смеси позволяет повысить прочность на растяжение в I,3-I,5 раза, на сжатие в I,2-I,4 раза, предельную растяжимость на I5-20%; удельная работа разрушения при этом возрастает в I,4-I,6 раза. Последнее особенно важно, так как повышается сопротивление материала ударным воздействиям в процессе транспортирования и монтажа, снижаются трудозатраты на ремонт околов и трещин.

На основе сырьевой шихты, состоящей из 90 мас.% известково-песчаной смеси (активность 23%, удельная поверхность 3600-4000 см^2/г), 7,5 мас.% шлакопортландцемента марки 400 и 2,5 мас.% гипса полуводного, при введении добавки асбеста в количестве 3% от массы сухой смеси,дисперсности песка 2000-2500 см^2/г и В/Т=0,75 получен ячеистый бетон со следующими физико-техническими показателями (табл.I):

Таблица I

Объемная масса,кг/м^3	Предел прочности, МПа	
	при сжатии	при растяжении
500	5,5	I,I
590	6,3	I,2
670	7,8	I,5

Примечание. При испытаниях влажность образцов составляла I0-I2% мас.%.

Отмечается [I6], что применение в качестве армирующей добавки щелочестойкого волокна менее эффективно. Это связано с плохой адгезией волокна к армируемой матрице.

Дисперсное армирование ячеистого бетона не нашло пока практического применения, главным образом вследствие трудностей, связанных с введением армирующей добавки в ячеистобетонную смесь, а также из-за отсутствия законченных научных разработок в области реологии таких смесей и практических рекомендаций по управлению процессами формирования пористости. Не решен также вопрос об использовании дисперсно армированных сырьевых композиций в производстве ячеистого бетона по резательной технологии.

По мнению авторов, заслуживает внимания способ приготовления ячеистобетонной смеси [I7], предусматривающий распушку армирующей волокнистой добавки при ее помоле с 5-I0% кремнеземистого компонента. Повы-

шение прочностных показателей ячеистого бетона может быть достигнуто также при использовании органических добавок, которые при автоклавной обработке, переходя в вязко-текучее состояние, покрывают стенки пор тонкой прочной пленкой или кольматируют устья. При полимеризации таких добавок образуются прочные адгезионные контакты с силикатной матрицей межпорового материала, что приводит к появлению своеобразных структурных "барьеров", которые блокируют развитие и распространение трещин. В итоге обеспечивается повышение прочностных показателей ячеистого бетона.

Не менее важно, что эти добавки обладают гидрофобными свойствами, что позволяет снизить интенсивность взаимодействия ячеистого бетона с водой и паром, т.е. обеспечить эффект объемной гидрофобизации. Например, добавка элементарной серы, вводимой в виде порошка, водного раствора сульфидов щелочных металлов или аммония в количестве 2-3% от массы сухих компонентов смеси обеспечивает повышение прочности на 50-150% [18]. При добавке 2% серы получен газобетон объемной массой 613 кг/м^3, прочностью на сжатие 9,1 МПа, в то время как объемная масса контрольных образцов составляла 607 кг/м^3, а прочность 5,0 МПа.

Другим примером является применение добавки полипропилена [19], которую вводили с целью объемной гидрофобизации.

Авторы предполагают, что положительные результаты могут быть получены также при использовании низкомолекулярного полиэтилена или других добавок этого класса, особенно при изготовлении газобетона, так как эти соединения не вступают в химическое взаимодействие с гидратными новообразованиями цемента. Исследованиями ВНИИстройполимера [20] показана возможность получения ячеистого бетона объемной массой 500-700 кг/м^3, прочностью на сжатие 7,0-14,0 МПа, на растяжение при изгибе 1,0-4,0 МПа, морозостойкостью 150-200 циклов. Материал без добавок имел прочность на сжатие 3,5-5,6 МПа, на растяжение при изгибе 0,6-1,5 МПа. Добавку вводили в ячеистобетонную смесь с водой затворения.

Заслуживают внимания исследования НИИЖБа по получению ячеистого бетонополимера [21]. Показана возможность повышения прочностных показателей ячеистого бетона на сжатие в 2 раза, на растяжение при изгибе на 40-70% и снижения водопоглощения в среднем в 2-5 раз. Разработанная технология рассчитана на пропитку ячеистого бетона низковязким мономером (метилметакрилатом) с последующим отверждением его непосредственно в автоклаве после завершения цикла гидротермальной обработки. При расходе мономера 10-15% от массы сухих компонентов смеси в лабораторных условиях получен ячеистый бетон объемной массой 535-740 кг/м^3 и прочностью на сжатие 4,0-10,0 МПа.

Исследования НИПИсиликатобетона [22] показывают, что снижение объемной массы при одновременном улучшении прочностных и эксплуатационных показателей ячеистого бетона может быть достигнуто: повышением гомогенности сырьевой шихты, для чего рекомендуется совместный помол компонентов; применением интенсивных режимов перемешивания ячеистобетонной смеси с использованием гидродинамических смесителей; оптимизацией параметров автоклавной обработки в зависимости от состава сырьевой шихты и химической активности кремнеземистого компонента, обеспечивающих синтез цементирующего вещества, содержащего 23-25% тоберморита 11,3 Å; введением добавок ПЭС-1 и ФРУ-20 в количестве 0,1% от массы сухих составляющих. В результате указанных мероприятий в заводских условиях получен ячеистый бетон объемной массой 570 кг/м^3, прочностью на сжатие 7,1 МПа, на растяжение при изгибе 1,2 МПа, на растяжение при раскалывании 0,56 МПа, морозостойкостью более 75 циклов.

Известно, что прочность плотных и легких бетонов обратно пропорциональна расходу воды затворения. Применительно же к ячеистым бетонам, особенно автоклавного твердения, эта зависимость справедлива лишь при получении материала объемной массой выше 500 кг/м^3. При получении ячеистых бетонов более низкой объемной массы, особенно теплоизоляционных, указанное выше положение теряет силу. В этом плане представляет интерес технология армированных волокном силикатных теплоизоляционных материалов [23], известная в нашей стране как технология известково-кремнеземистых изделий (ИКИ). Главное функциональное назначение этих материалов - высокотемпературная теплоизоляция промышленного и энергетического оборудования.

По своим качественным показателям известково-кремнеземистые изделия превосходят теплоизоляционный ячеистый бетон. В частности, при объемной массе 160-225 кг/м^3 ИКИ имеют прочность при изгибе не менее 0,2-0,3 МПа. В связи с этим авторам представляется целесообразным заимствование из этой технологии применительно к теплоизоляционным ячеистым бетонам таких приемов, как дисперсное армирование, использование повышенного количества воды затворения и совмещение тепловлажностной обработки и сушки изделий под давлением в автоклаве.

Вместе с тем опыт производства ячеистобетонных изделий и конструкций с применением комплексной вибрационной технологии показывает, что уменьшение количества воды затворения положительно влияет на качество готовой продукции и технико-экономические показатели производства. Поэтому определенный интерес представляют вопросы снижения В/Т при получении конструкционных и конструктивно-теплоизоляционных ячеистых бетонов за счет применения суперпластификаторов, положительно зарекомендовавших себя в технологии тяжелых и легких бетонов.

Исследованиями НИИЖБа [24] и Пензенского ИСИ [25] установлено, что применение суперпластификаторов в комплексе с добавками-интенсификаторами структурообразования позволяет при той же объемной массе увеличить прочностные показатели ячеистого бетона на 15-20%, морозостойкость в 2 раза, а также повысить трещиностойкость ячеистобетонных конструкций. Особенно эффективно применение суперпластификаторов и комплексной вибрационной технологии формования, так как в этом случае можно обеспечить нормальные условия поризации ячеистобетонной смеси без применения интенсификаторов структурообразования. Отмечается [25], что наиболее рационально введение суперпластификатора в мельницу мокрого помола песка совместно с интенсификатором помола. Это позволяет повысить производительность мельниц и устойчивость шлама к расслоению, снизить суммарные удельные энергозатраты на помол, перекачку шлама и его выдерживание в шламбассейнах. Особенно эффективно применение суперпластификаторов в производстве ячеистого бетона неавтоклавного твердения. Сообщается [24], что в этом случае возможно получение газобетона с такими же физико-механическими показателями, как у ячеистого бетона автоклавного твердения.

Одним из направлений повышения эксплуатационных показателей ячеистого бетона является улучшение качества пористой структуры материала. Основным резервом здесь является совершенствование теории и практики разработанной в СССР комплексной вибрационной технологии формования. Актуальность этого направления связана и с разработкой технической документации предприятий нового поколения, отличительной особенностью которых является формование ячеистобетонных массивов высотой 1200-1500 мм при получении конструктивно-теплоизоляционных ячеистых бетонов объемной массой 500-600 кг/м^3.

На основе исследований ВНИИстрома им. П.П.Будникова [26] разработан алгоритм управления процессом виброформования ячеистобетонных массивов высотой до 1200 мм. Разброс показателей объемной масс по высоте массива не превышает 45 кг/м^3, коэффициент изменчивости прочности 0,07-0,18, одновременно достигнуто повышение прочностных показателей на 20-45% в сравнении с нормативными. В соответствии с разработанным алгоритмом в первый период вспучивания до достижения максимальной его скорости смесь вибрируется при частоте 22-30 с$^{-1}$ и амплитуде 0,5-0,75мм. При снижении скорости вспучивания до 2-4 см/мин амплитуда и частота вибрационных воздействий на смесь снижаются соответственно до 0,25-0,5 мм и 15-20 с$^{-1}$. Вибровоздействие рекомендуется прекращать при скорости вспучивания 0,5-1 см/мин. Такие режимы вибрационных воздействий позволяют повысить газоудерживающую способность смеси и улучшить качество межпорового материала, что в итоге улучшает прочностные и эксплуатационные показатели ячеистого бетона.

Комплекс работ НИПИсиликатобетона по совершенствованию процесса виброформования позволил выявить и обосновать преимущества низкочастотных циклических механических воздействий на вспучивающуюся ячеистобетонную смесь. Это явилось основой для разработки ударной технологии формования ячеистого бетона [27, 28]. Для этих целей институтом была изготовлена экспериментальная ударная площадка ЛВ-32/33, которая апробирована в заводских условиях. Установлено [28], что применение ударных механических воздействий на вспучивающуюся ячеистобетонную смесь позволяет улучшить качество и однородность пористости материала и практически исключить нарушение сплошности межпоровых перегородок. В результате повышаются физико-механические показатели ячеистого бетона и снижается удельный расход вяжущего. По ударной технологии формования получен автоклавный ячеистый бетон объемной массой 545-565 кг/м^3 с пределом прочности при сжатии 4,4-5,3 МПа. Коэффициент вариации объемной массы для массива высотой 600 мм составлял 0,03-0,04, изменчивость прочности на сжатие 0,11-0,12. По сравнению с применяемой в настоящее время виброплощадкой К-494 ударная площадка ЛВ-33 имеет в 3-4 раза меньшую установленную мощность, обеспечивает снижение расхода электроэнергии в 8 раз, энергоемкость в 14 раз, металлоемкость в 3 раза. Экономический эффект составляет 1,3-1,5 руб/м^3 [28].

Традиционная технология ячеистых бетонов предусматривает поризацию сырьевой смеси методом введения в нее газообразователя - обезжиренной алюминиевой пудры. Этому способу присущи существенные недостатки, которые отрицательно влияют на качество формируемой пористости и соответственно на физико-механические и эксплуатационные показатели материала, а именно: неравномерность распределения алюминиевой пудры в объеме смеси; трудность управления процессом газообразования вследствие непостоянства величины pH вспучивающейся смеси, ее температуры и реологических характеристик; взрывоопасность алюминиевой пудры. В настоящее время имеются предпосылки устранения большинства перечисленных недостатков, что позволит существенно улучшить качество продукции и условия труда. В частности, имеются положительные результаты использования взрывобезопасного пастообразного газообразователя [29, 30], применение которого обеспечивает безопасность условий труда и положительно сказывается на физико-технических показателях ячеистого бетона.

Для управления дифференциальной газовой пористостью и напряженным состоянием матрицы в процессе вспучивания ячеистобетонной смеси Киевским НИИСМИ предложено вводить в состав смеси газообразователь "второго

порядка", используя для этого кремнийметаллические сплавы, реагирующие в щелочной среде с выделением водорода, например ферросилиций [31]. Применение комплексного газообразователя дает возможность уменьшить величину открытой пористости на 19%, повысить морозостойкость в 1,5 раза, прочность ячеистого бетона на 25-35% [32].

Чтобы улучшить качество пористости, получить возможность регулировать геометрические параметры пор и обеспечить многомодальное распределение пор по размеру, в МИСИ им. В.В.Куйбышева [33] была разработана газопенная технология получения ячеистых бетонов. Поризация смеси в соответствии с этой технологией осуществляется за счет воздухововлечения и газообразования. Однако предварительная поризация ячеистобетонной смеси путем введения в нее ПАВ не дала ожидаемого эффекта. Это связано с недостаточно интенсивным перемешиванием смеси в газобетоносмесителях первого поколения. Учитывая это, МИСИ совместно с Белгород-Днестровским экспериментальным заводом ячеистых бетонов и изделий предложили способ трехстадийной поризации ячеистобетонной смеси [34], включающий:

- аэрацию песчаного шлама в мельнице за счет ПАВ;
- аэрацию сырьевой смеси в смесителе за счет ПАВ;
- поризацию ячеистобетонной смеси в форме в результате газообразования.

Аэрация песчаного шлама осуществляется в процессе мокрого помола песка за счет введенной в мельницу совместно с водой воздухововлекающей добавки, например сульфонола, в виде 0,02-0,03%-ного раствора. Мокрый помол песка с добавкой ПАВ обеспечивает улучшение условий помола, позволяет повысить плотность шлама на 4-5% без изменения его реологических характеристик и достичь воздухосодержания шлама порядка 18-22%. Равномерно распределенные в объеме шлама пузырьки вовлеченного воздуха диаметром 0,03-0,08 мм повышают его седиментационную устойчивость. Степень дезаэрации шлама при суточном выдерживании в шламбассейнах не превышает 5%.

Аэрация сырьевой смеси в смесителе осуществляется за счет введения с водой затворения ПАВ в количестве 0,02-0,03% от массы сухих материалов. При этом дополнительное количество воды с добавкой ПАВ вводится в смеситель после подачи аэрированного песчаного шлама и перемешивается до введения газообразователя в течение 5-6 мин. Особенно эффективны в этом случае гидродинамические смесители. В связи с тем что вводимые в смесь добавки ПАВ замедляют процессы гидратации и газовыделения, в сырьевую смесь с водой затворения вводят добавки хлористых солей натрия или кальция в количестве 1,5-2,5% от массы сухой смеси.

Способ трехстадийной поризации позволил за счет улучшения качества пористости снизить объемную массу ячеистого бетона без ухудшения его прочностных показателей на 6-10%.

При этом отмечается увеличение прочности ячеистого бетона на растяжение при изгибе на 10-15%, несмотря на снижение исходной объемной массы.

На основе сырьевой смеси состава (мас.%):

шлакопортландцемент М-400 - 12; известь негашеная (А=75%) - 15; песок кварцевый с содержанием SiO_2 = 97%; удельной поверхностью 1500 $см^2/г$ - 70; гипс полуводный - 2; хлористый натрий - 1 - при В/Т = 0,32 способом трехстадийной поризации получен ячеистый бетон объемной массой 500-550 $кг/м^3$, прочностью на сжатие 5,2-5,7 МПа, на растяжение при изгибе 0,73-0,82 МПа.

Преимущество многоступенчатой поризации в производстве ячеистых бетонов отмечается также в других работах [35]. Показана возможность [35] получения ячеистого бетона объемной массой 520-550 $кг/м^3$ с прочностью на сжатие 5,3-5,8 МПа на основе сырьевой смеси с В/Т = 0,5-0,8 следующего состава (мас.%):

Кварцевый песок	42-80
Цемент	5-28
Известь негашеная высокоактивная............................	15-30
Триэтаноламин (от массы извести)...	2
Перекись водорода (от массы извести)..	1,4

Повышение равномерности распределения алюминиевой пудры в объеме ячеистобетонной смеси достигается за счет повышения интенсивности ее перемешивания, например при использовании гидродинамических смесителей и увеличении продолжительности перемешивания суспензии алюминиевой пудры в смесителе. Последнее обеспечивается при следующей последовательности дозирования компонентов в смеситель [36]: песчаный шлам + водная суспензия алюминиевой пудры + добавка ПАВ + вода + цемент + известково-песчаная смесь. Продолжительность перемешивания после введения известково-песчаной смеси не должна превышать 2 мин, а температура ячеистобетонной смеси - 35°С. Такой порядок дозирования обеспечивает более полное использование газообразователя, повышение однородности ячеистобетонных изделий по объемной массе и прочности. При этом наблюдается снижение объемной массы на 20-35 $кг/м^3$ и повышение прочностных показателей до 15% в зависимости от исходной объемной массы изделий. Отмечается также изменение характера дифференциальной пористости - уменьшается средний диаметр газовых пор.

Таким образом, можно констатировать, что в технологии ячеистых бетонов еще имеются значительные резервы, реализация которых обеспечит существенное повышение качества готовой продукции. Однако при этом не следует ожидать, что одновременная реализация рассмотренных технологических приемов улучшения качества пористой структуры позволит резко повысить физико-механические показатели ячеистого бетона в результате суммирования эффектов по каждому из рассмотренных технологических приемов. Каждый прием обеспечит достижение ожидаемого эффекта только в том случае, если его применение будет увязано с применяемой на предприятии технологией, особенностями состава сырьевых материалов и сырьевых смесей, способом формования. Для всех предприятий, работающих по мокрой схеме подготовки кремнеземистого компонента, безотносительно к индивидуальным особенностям технологии могут быть рекомендованы применение ударной технологии формования, введение в мельницу мокрого помола добавки ПАВ - сульфонола хлорного, триэтаноламина и т.п., а также изложенный выше порядок дозирования суспензии алюминиевой пудры.

ВОПРОСЫ СОВЕРШЕНСТВОВАНИЯ ТЕХНОЛОГИИ ТЕПЛОИЗОЛЯЦИОННОГО ЯЧЕИСТОГО БЕТОНА

Применение теплоизоляционных материалов и изделий, главной функцией которых является тепловая изоляция ограждающих конструкций зданий, промышленного и энергетического оборудования, трубопроводов и др., является одним из важнейших направлений технического прогресса в строительстве и основывается на разделении функций материалов с целью их оптимального использования.

Использование специальных теплоизоляционных материалов в качестве утепляющих слоев ограждающих конструкций более эффективно, чем применение традиционных материалов. Это связано с повышением термического сопротивления ограждающих конструкций теплопередаче, что способствует снижению затрат на отопление. Не менее важно, что улучшение теплофизических характеристик теплоизоляционных материалов в результате совершенствования технологии их получения позволит при минимальных производственных издержках получить значительный народнохозяйственный эффект от уменьшения потерь тепла через ограждающие конструкции. Последнее особенно важно применительно к производству теплоизоляционного ячеистого бетона.

Ежегодно в качестве теплоизоляции используется более 2 млн.м^3 изделий из ячеистого бетона, что составляет более 10% всего выпуска теплоизоляционных материалов в стране. Средняя объемная масса теплоизо-

ляционных плит из ячеистого бетона составляла в 1979 г. 391 кг/м^3 и лишь 37,7% (740 тыс.м^3) изделий имели объемную массу 300-350 кг/м^3 и теплопроводность соответственно 0,075-0,095 Вт/(м·°С) [10]. В то же время согласно требованиям СНиП II-3-79 сопротивление теплопередаче ограждающих конструкций следует принимать равным экономически целесообразному сопротивлению, но не менее требуемого по санитарно-гигиеническим условиям. Чтобы обеспечить нормативный уровень теплопотерь через ограждающие конструкции, необходимо применять теплоизоляционные материалы теплопроводностью не выше 0,06 Вт(м·°С) (при t = 25°С). Этому требованию отвечают теплоизоляционные ячеистые бетоны объемной массой не выше 250 кг/м^3.

Учитывая дефицит в эффективных теплоизоляционных материалах, видимо, трудно ожидать в ближайшем будущем резкого сокращения производства теплоизоляционного ячеистого бетона. В этой связи вопрос улучшения теплофизических характеристик теплоизоляционного ячеистого бетона за счет снижения его объемной массы до 200-250 кг/м^3 приобретает первостепенное значение. Работы МИСИ им. В.В.Куйбышева, Киевского НИИСМИ, ВНИИтеплоизоляции, НИИЖБа, Воронежского ИСИ и ряда других организаций показали возможность получения теплоизоляционного ячеистого бетона объемной массой 75-250 кг/м^3 с прочностью на сжатие 0,09-1,2 МПа.

МИСИ совместно с Киевским НИИСМИ разработаны и широко опробованы в условиях Белгород-Днестровского завода технологические приемы и составы сырьевой смеси, обеспечивающие стабильное получение ячеистого бетона γ_0 = 200-250 кг/м^3 с прочностью на сжатие 0,5-0,7 МПа и на изгиб 0,15-0,2 МПа [37, 38]. В основу технологии положен способ трехстадийной поризации ячеистобетонной смеси. В этом случае он оказался особенно эффективным, так как насыщение ячеистобетонной смеси мельчайшими воздушными пузырьками обеспечило ее структурирование и увеличение предельного напряжения сдвига. Это позволило при газовой поризации получить пористую структуру, по характеру и форме близкую к сотовой с многомодальным распределением пор по размеру.

Рекомендуемые составы ячеистобетонной смеси приводятся ниже:

Материалы	Состав ячеистобетонной смеси, мас.%
Портландцемент марок 400, 500	11-20
Известь негашеная (в пересчете на 100%-ную активность)......................	6-10
Песок кварцевый удельной поверхностью, см^2/г:	
1800-2000 (в известково-песчаной смеси)	18-28
3000-3500 (в шламе)	8-13

Хлористый натрий (кальций)	I,2-I,7
Алкилсульфонол	0,0I-0,03
Алюминиевая пудра	0,I5-0,27
Вода	33-42

Для защиты от увлажнения предусмотрена поверхностная обработка изделий составами, приведенными в табл. 2.

Таблица 2

Материалы	Содержание компонентов, мас.%	Способ нанесения
Битум БН 70/30 Бензин (керосин)	25-30 70-75	Окунание в раствор при 20-30°С
Латекс СКС-65ГП Стабилизатор ОП-7 Вода	40 0,6 59,4	Окунание в раствор или распыление пневмофорсункой
Рубероид (пергамин) по битуму БН-70/30	-	Оклейка рабочих поверхностей
Рубероид (пергамин)	-	
Клеевой состав: латекс СКС- 65ГП стабилизатор ОП-7 вода	 85 I I5	Оклейка рабочих поверхностей

НИИЖБом совместно с Воронежским ИСИ, Ростовским ИСИ и Уральским Промстройниипроектом разработаны рекомендации по составу ячеистобетонной смеси и параметрам технологического процесса, обеспечивающим получение теплоизоляционного ячеистого бетона объемной массой 250-300 кг/м³ [20]. Следует отметить, что рекомендуемое [39] введение в ячеистобетонную смесь добавки низкосортного асбеста марок К-6-20 и К-6-30 в количестве 3-5% от массы сухих компонентов обеспечивает получение материала объемной массой I90-235 кг/м³ с пределом прочности при сжатии 0,87-I,I МПа, при изгибе 0,2-0,23 МПа [I6]. Последнее особенно важно в связи с хрупкостью изделий, осложняющей их транспортирование и монтажные работы.

В ВИСИ проведены исследования, показывающие возможность получения теплоизоляционного ячеистого бетона объемной массой 75-I00 кг/м³ с прочностью на сжатие до 0,I МПа. И хотя массовое производство такого

материала в заводских условиях связано с рядом трудностей, сам факт получения ячеистого бетона столь низкой объемной массы говорит о значительных резервах в технологии ячеистых бетонов.

Серьезным недостатком теплоизоляционных ячеистобетонных изделий являются большие допуски по размерам, что приводит к появлению "мостиков холода" в зазорах между плитами в конструкции и резкому (до I0-I5%) снижению теплозащитных показателей ограждающих конструкций. В этой связи особенно актуальными представляются разработки ВНИИтеплоизоляции [40] по созданию конвейерной технологической линии производства калиброванных ячеистобетонных плит с механизацией и автоматизацией основных технологических процессов: чистки, смазки поддонов, снятия "горбушки", разрезки массива, штабелирования поддонов. Линия рассчитана на выпуск калиброванных плит из ячеистого бетона со следующими основными показателями:

Объемная масса, кг/м³	300-350 (в перспективе 200-250)
Предел прочности при сжатии, МПа....	0,8-I,2
Размер плит, мм	I000x500x(80÷20)
Допуск по размерам, мм	± I

Положительный опыт производства ячеистого бетона объемной массой 300 кг/м³ с прочностью на сжатие I,I МПа имеется на Темиртауском комбинате "Промстройиндустрия" [4I]. Экономический эффект только в сфере производства от снижения объемной массы с 400 до 300 кг/м³ составляет 35,6 тыс.руб. в год.

Фирма "Итонг" сообщает о разработке технологии производства ячеистого бетона объемной массой 200 кг/м³ с прочностью на сжатие не менее I,0 МПа. Все это свидетельствует о возможности и необходимости перехода к выпуску теплоизоляционного ячеистого бетона средней плотностью не более 250 кг/м³.

ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ ПРИЕМЫ УЛУЧШЕНИЯ ЭКСПЛУАТАЦИОННЫХ ПОКАЗАТЕЛЕЙ ЯЧЕИСТОБЕТОННЫХ КОНСТРУКЦИЙ

Многолетняя практика производства и применения ячеистых бетонов показывает, что между технологическими параметрами производства и эксплуатационными показателями материала существует неразрывная взаимосвязь. Поэтому улучшение эксплуатационных показателей ячеистобетонных изделий должно основываться на оптимизации основных технологических

параметров производства с учетом характеристик применяемого сырья, номенклатуры продукции и условий эксплуатации изделий.

Известно, что долговечность ячеистобетонных конструкций в значительной мере определяется их трещиностойкостью. Трещины, появляющиеся в процессе изготовления и развивающиеся при эксплуатации, не только ухудшают внешний вид изделий, но и резко понижают надежность их эксплуатации, поскольку являются очагами разрушения бетона и коррозии арматуры. Основной причиной появления и развития трещин является возникновение в отдельных микрообъемах материала деформаций растяжения, превышающих предельную растяжимость. В соответствии с этим повышению трещиностойкости способствуют все те факторы, которые позволяют уменьшить величину деформаций усадки материала и увеличить его предельную растяжимость, прямо пропорциональную пределу прочности при растяжении и обратно пропорциональную модулю упругости бетона.

Технологические приемы повышения предела прочности при растяжении и снижения модуля упругости были рассмотрены в предыдущих разделах обзора. Следует лишь добавить, что увеличение предельной растяжимости (за счет уменьшения модуля упругости) может быть также достигнуто в результате формирования такой структуры цементирующего вещества, в которой помимо хорошо закристаллизованных новообразований (низкоосновных гидросиликатов кальция и тоберморита) имеются включения гелевидной фазы, равномерно распределенной в объеме силикатного камня [42]. Микротрещины и микродефекты в подобных структурах при приложении внешней нагрузки развиваются медленнее, что связано с их блокированием в процессе пластической деформации силикатного камня.

Другое основное направление повышения трещиностойкости ячеистобетонных изделий - это снижение величины влажностной усадки материала, которая из-за высокой интенсивности более опасна, чем карбонизационная усадка [43]. Здесь следует подчеркнуть, что в стандартах ряда зарубежных стран регламентирована величина влажностной усадки ячеистого бетона [8]. Она не должна превышать 0,5 мм/м и, как правило, составляет 0,3-0,4 мм/м, что при значении предельной растяжимости ячеистого бетона 0,45-0,55 мм/м практически исключает возможность появления усадочных трещин.

Как указывалось выше, эффективным технологическим приемом повышения трещиностойкости ячеистобетонных изделий на стадии изготовления и эксплуатации является применение сырьевых композиций на основе грубомолотого песка удельной поверхностью 900-1200 см^2/г [37, 43, 44]. Особенно эффективным оказывается сочетание "сухой" схемы подготовки сырьевых материалов с применением композиций на основе грубомолотого песка

[4]. Применение сырьевых композиций на основе грубомолотого песка позволяет в условиях автоклавной обработки снизить расход цемента и извести до 25% без ухудшения прочностных показателей ячеистого бетона. В частности, при производстве ячеистобетонных изделий объемной массой 600-1200 кг/м^3 рекомендуются следующие составы сырьевых композиций (табл. 3).

Таблица 3

Компонент	Состав		
	1	2	3
Песок (с содержанием SiO_2 не менее 95%) удельной поверхностью 900-1200 см^2/г	70	70	70
Портландцемент марки 400	12	13	14
Известь негашеная	18 (при активности 70-75%)	17 (при активности 75-80%)	16 (при активности 80% и выше)

При раздельной схеме подготовки сырьевых материалов мокрый помол грубой фракции песка осуществляется в присутствии добавки ПАВ, что практически исключает расслоение шлама при его выдерживании в шламбассейнах [37]. Применение сырьевых композиций на основе грубомолотого песка обеспечивает снижение деформаций влажностной усадки до 0,28-0,35 мм/м и повышение трещиностойкости ограждающих конструкций в 1,5-2 раза.

Эффективным оказывается применение сырьевых композиций на основе грубомолотого песка с целью исключений явлений трещинообразования в процессе производства конструкционных ячеистобетонных изделий объемной массой 800-1200 кг/м^3 [45]. Внедрение сырьевых смесей на основе композиционного состава песка, включающего грубомолотую и тонкодисперсную составляющие, на Белгород-Днестровском заводе [37] позволило исключить брак, связанный с трещинообразованием ячеистобетонных изделий в период автоклавной обработки и успешно освоить производство конструкционных элементов марок 50 и 75 для строительства жилых домов серии 126.

Снижению деформаций влажностной усадки способствует применение известково-шлако-песчаного вяжущего [12], состав которого рассмотрен в предыдущих разделах настоящего обзора. Достигаемое при использовании этого вяжущего повышение предела прочности при растяжении в 1,5 раза при одновременном снижении величины влажностной усадки до 0,25мм/м позволяет получить ячеистый бетон высокой трещиностойкости [12].

Известно, что повышение однородности изделий по прочности, объемной массе, фазовому и морфологическому составу новообразований способствует повышению их эксплуатационной надежности. Повышение однородности фазового и минералогического состава новообразований, а следовательно, и прочности ячеистого бетона достигается за счет улучшения гомогенности сырьевой смеси и сокращения продолжительности прогрева изделий в процессе автоклавной обработки. Сокращение времени выравнивания температуры по высоте ячеистобетонного массива достигается при повышении температуры загружаемых в автоклав сырцовых изделий до 70-80°С, оптимизации их предавтоклавной влажности [46], применении эффективных режимов автоклавной обработки с молярным переносом тепла [39], а также специальных режимов автоклавной обработки, предусматривающих на стадии подъема температуры и давления продувку с одновременным вакуумированием [47].

Долговечность ячеистого бетона регламентируется его карбонизационной стойкостью. Повышение карбонизационной стойкости, как известно, достигается формированием структуры цементирующего вещества с содержанием до 40% по объему тоберморита II,3 Å, а также уменьшением паропроницаемости ячеистого бетона. Вместе с тем интенсивность карбонизационной агрессии существенно зависит от влажностного состояния материала. Наиболее интенсивно карбонизация протекает при влажности ячеистого бетона I3-I8 мас.%, значительно замедляется при более высокой влажности и практически затухает при влажности 5-7%, соответствующей равновесной.

Карбонизация ячеистого бетона сопровождается деформациями усадки и частичным (до 25%) снижением прочностных показателей. При снижении влажности ячеистого бетона от 13-18% до равновесной на деформации карбонизационной усадки налагаются влажностные деформации. При этом интенсивность и суммарная величина деформаций усадки могут превысить значение предельной растяжимости ячеистого бетона и его релаксационную способность, что вызовет появление и раскрытие трещин. В этой связи важно создать нормальный влажностный режим ячеистобетонных ограждающих конструкций, который должен обеспечить возможность релаксации возникающих в теле бетона напряжений или снизить их величину. Во-первых, этого можно достичь при монтажной влажности ячеистобетонных конструкций не выше I0 мас.%.

Другим направлением является обеспечение за счет технологических приемов такого влажностного режима высушивания изделий до равновесной влажности, при котором интенсивность суточных деформаций (влажностных и карбонизационных) в первые 6 месяцев эксплуатации не превышает

0,002 мм/(м·сут$^{-I}$), а в последующие I2-I8 мес. 0,0015 мм/(м·сут)$^{-I}$. Для этого могут быть рекомендованы отделка ограждающих конструкций внутренней пароизоляцией и применение наружной вентилируемой облицовки в виде паропроницаемой краски, обшивки наружных стен листовыми материалами, в виде вентилируемого пространства под водопроницаемым ковром на крыше [48], а также составов пароизоляционных покрытий, описанных в обзоре [I9].

Основным достоинством ячеистобетонных ограждающих конструкций являются высокие теплоизоляционные показатели. Например, для климатических условий Московской области требуемое сопротивление теплопередаче стены жилого дома из ячеистого бетона объемной массой 600 кг/м³ обеспечивается при толщине 2I см, из керамзитобетона объемной массой II00 кг/м³ - при толщине 35 см, из глиняного кирпича - при толщине 5I см [I]. При этом масса I м² стены составляет соответственно I70, 330, 700 кг. Вместе с тем теплозащитные характеристики ячеистого бетона существенно зависят от его влажности. Величина расчетного коэффициента теплопроводности λ_p ячеистого бетона в зависимости от его влажности W определяется по формуле [49]

$$\lambda_p = \lambda_{сух}\left(1 + \frac{W \cdot \delta_W}{100}\right),$$

где $\lambda_{сух}$ - теплопроводность сухого ячеистого бетона, Вт/(м·°С);

δ_W - прирост теплопроводности на I% объемной влажности,%.

По данным НИИЖБа [50], δ_W в зависимости от объемной массы ячеистого бетона имеет следующие значения (табл. 4):

Таблица 4

Показатели	Значения				
Объемная масса, кг/м³	300	400	500	600	700
Прирост теплопроводности на I% объемной влажности, %	8,2	8,0	7,2	7,0	6,3

Из табл. 4 следует, что по мере снижения объемной массы прирост теплопроводности на каждый процент увеличения объемной влажности возрастает на бо́льшую величину. Это предопределяет необходимость надежной защиты ячеистобетонных изделий и конструкций от увлажнения в процессе транспортирования и монтажа. Например, при относительной влажности окружающей среды P/P_0 = 0,5-0,6 равновесная влажность ячеистого бетона объемной массой 600 кг/м³ достигает 5% по массе или 3% по объе-

му. Подставив эти данные в формулу $\lambda_р$ и используя данные табл. 4, получим

$$\frac{\lambda_р}{\lambda_{сух}} = \frac{\lambda_{сух}\left(I + \frac{3\cdot 7}{100}\right)}{\lambda_{сух}} = I,2I,$$

т.е. теплопроводность увеличивается на 21% по сравнению с ячеистым бетоном, высушенным до постоянной массы.

В связи с этим при изготовлении ячеистобетонных изделий должна быть предусмотрена защита их от возможного увлажнения в процессе перевозки, монтажа и эксплуатации. В настоящее время имеется много технологических приемов и составов, обеспечивающих надежную защиту ячеистобетонных изделий от увлажнения [45]. Заслуживает внимания опыт ряда зарубежных фирм, которые, несмотря на высокие эксплуатационные показатели выпускаемых ячеистобетонных изделий, предусматривают упаковку их в полиэтиленовую усадочную пленку на специальных автоматизированных линиях [8].

СНИЖЕНИЕ ТОПЛИВНО-ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ ЗАТРАТ В ПРОИЗВОДСТВЕ ИЗДЕЛИЙ ИЗ ЯЧЕИСТЫХ БЕТОНОВ

Экономия топливно-энергетических ресурсов приобретает все возрастающее значение и затрагивает практически все отрасли промышленности строительных материалов. Важным показателем любого производства является его энергоемкость - суммарные затраты тепловой и электрической энергии на получение единицы продукции. Работы последних лет показывают, что производство ячеистых бетонов является энергосберегающей технологией. Анализ энергоемкости производства ячеистобетонных изделий свидетельствует о том, что на изготовление I $м^2$ стены требуемого термического сопротивления расходуется около 57,5 тыс.ккал тепла. Изготовление I $м^2$ керамзитобетонной стены аналогичного термического сопротивления связано с расходом 207,5 тыс.ккал тепла, что более чем в 3,5 раза превышает затраты тепла на изготовление I $м^2$ стены из ячеистого бетона. При этом в сфере производства затраты тепла на получение I $м^3$ автоклавного ячеистого бетона составляют около 228,5 тыс.ккал, что более чем в 2,5 раза ниже расхода тепла на получение I $м^3$ керамзитобетона [5I].

В настоящее время имеются реальные возможности снижения расхода тепла при производстве автоклавных ячеистых бетонов как за счет уменьшения их материалоемкости (снижения объемной массы), так и за счет совершенствования отдельных, наиболее энергоемких технологических переделов. Топливно-энергетические затраты на получение I $м^3$ ячеистого бетона на различных предприятиях отрасли колеблются в значительных пределах и составляют: затраты тепла от 0,192 до 0,52-I,0 Гкал, электроэнергии от I0,I-I6,7 до 20-50 кВт·ч, а в отдельных случаях до 65-75 кВт·ч [52]. В целом же топливно-энергетические затраты в зависимости от вида изделий составляют 5,2-I6,6% от полной себестоимости [52].

Наиболее энергоемкими переделами в технологии ячеистых бетонов являются автоклавная обработка и подготовка (помол) сырьевых материалов. Исследованиями МИСИ [7, 37], НИПИсиликатобетона и Воронежского ИСИ [5, 6] установлена возможность снижения удельных затрат электроэнергии при помоле на 30-40% и суммарных энергетических затрат (на помол и автоклавную обработку) в I,5 раза при использовании способа совместного сухого помола компонентов. Не менее важно, что при этом снижается износ мелющих тел и футеровки мельницы [9]. Имеются сведения [6], что стоимость теряемого металла при совместном помоле на 60-70% ниже, чем при раздельном. Следует отметить, что применение способа совместного сухого помола позволяет на предприятии мощностью I00 тыс.$м^3$ в год высвободить около 30 единиц технологического оборудования, предназначенного для транспортирования шлама и его выдерживания в шламбассейнах. При этом дополнительно достигается экономия электроэнергии и сжатого воздуха, сокращаются производственные площади.

При раздельном помоле компонентов затраты электроэнергии могут быть снижены за счет мокрого помола песка с добавкой ПАВ, что одновременно положительно влияет на физико-технические показатели готовой продукции. Применение ПАВ, например сульфонола, в количестве 0,03% от массы песка позволяет повысить плотность шлама на 4-5% без ухудшения его подвижности, что обеспечивает повышение производительности помольного оборудования в I,3-I,4 раза и снижение удельных энергозатрат на 5-6 кВт·ч/т, или I0 15% [7]. Особенно эффективным, как показывает опыт Белгород-Днестровского завода [37], является применение сырьевых композиций на основе грубомолотого песка. Мокрый помол основной массы песка (68-75%) до удельной поверхности 900 $см^2/г$ в присутствии добавки ПАВ позволил повысить производительность помольного оборудования в 2 раза, снизить суммарные удельные энергозатраты на подготовку сырьевых материалов на 8-I0 кВт·ч/т [37].

Самым продолжительным и энергоемким технологическим переделом в производстве ячеистых бетонов является автоклавная обработка. Расход пара на автоклавную обработку I $м^3$ ячеистого бетона средней плотностью 700 $кг/м^3$ равен в среднем 0,I9 Гкал, что составляет более 80% суммарных затрат тепла на весь технологический процесс. В этой связи вопросы уменьшения расхода тепла и сокращения продолжительности автоклавной обработки приобретают особую актуальность.

Из рассмотрения статей расхода пара на автоклавную обработку ячеистобетонных изделий следует, что на нагрев воды, введенной в автоклав в виде технологической влаги сырца, расходуется 21% пара, при сбросе конденсата теряется около 26% тепла. Снижение указанных потерь тепла возможно за счет оптимизации предавтоклавной влажности и температуры ячеистобетонного сырца, уменьшения объема конденсата, обеспечения его постоянного отвода и утилизации тепла конденсата, что видно из приводимых ниже данных:

Статьи затрат	Относительный расход пара, %
Нагрев сухих компонентов ячеистого бетона	17
Нагрев воды затворения в бетоне	21
Нагрев автоклава	22
Нагрев металлических форм и вагонеток	3
Теплота пара свободного пространства автоклава	4
Потери тепла за весь период автоклавной обработки	7
Потери тепла при сбросе конденсата	26

Теплотехнические расчеты и их промышленная проверка [46] показали, что температура подаваемых в автоклав изделий должна составлять 70-80°С, влажность - 28-30% по массе. Это позволяет снизить расход технологического пара на 9-13% и сократить продолжительность автоклавной обработки на 1,5-2 ч за счет предварительного прогрева изделий. Реализация этих мероприятий обеспечивается при использовании комплексной вибрационной технологии и сырьевых композиций на основе грубомолотого песка. Представляется возможным снизить величину В/Т до 0,31-0,33, ей соответствует предавтоклавная влажность сырцовых изделий 28-30% [46].

Обеспечение температуры загружаемых в автоклав ячеистобетонных сырцовых изделий в пределах 70-80°С достигается за счет более полного использования тепла, выделяющегося при гидратации цемента и извести, но главным образом за счет осуществления процессов вспучивания, схватывания и вызревания отформованных изделий в специальных туннелях с регулируемой температурой и влажностью среды. Применение тепловых туннелей-конвейеров вызревания с относительной влажностью и температурой среды соответственно 80-95% и 70-80°С широко практикуется на заводах большинства зарубежных фирм [8]. При выгрузке изделий из автоклава теряется до 15% тепла. В этой связи представляется важным обеспечить возврат этого тепла в производство, например, за счет применения рекуперационных туннелей вызревания. Принимая во внимание, что многие заводы не имеют автономных котельных, представляется целесообразным в период отопительного сезона предусмотреть перевод их на автоклавную обработку паром пониженной температуры и давления (t = 145-155°С) за счет применения технологически простых и практически доступных мероприятий [9]. Это позволит снизить удельные расходы тепла на автоклавную обработку в 1,3-1,4 раза.

Не менее важным является сокращение продолжительности автоклавной обработки. Для этого ВНИИстромом предложены режимы автоклавной обработки, предусматривающие удаление воздуха из автоклава путем его продувки паром (СН 277-80). Исследования, выполненные МИСИ совместно с Белгород-Днестровским заводом, показали, что продолжительность автоклавной обработки может быть дополнительно сокращена за счет более полного удаления воздуха из автоклава и запариваемых изделий при использовании продувки совместно с вакуумированием. Для этого после пуска в автоклав пара, когда давление его составит 0,005-0,01 МПа, на 30-40 мин включается вакуум-насос. После его отключения продувка продолжается до момента, когда давление (изб.) в автоклаве достигнет 0,05 МПа. Затем закрывается паровыпускной вентиль и осуществляется подъем давления до рабочего в течение 1-1,5 ч.

Внедрение таких режимов автоклавной обработки на Белгород-Днестровском заводе (табл. 5) позволило сократить продолжительность изотермической выдержки на 1-2 ч, а общую продолжительность автоклавной обработки на 2,5 ч [53]. В результате внедрения сокращенных режимов автоклавной обработки расход пара снижен на 15-20% и увеличена однородность ячеистобетонных изделий по прочности [53].

Таблица 5

Изделия	Режим автоклавной обработки, ч		
	без продувки	с продувкой	продувка с вакуумированием
Панели	3 + 13-14 + 3	4 + 9 + 3	3 + 8 + 3
Мелкие блоки	3 + 10 + 3	3,5 + 8 + 3	3 + 6 + 3

Таким образом, применение мокрого помола песка в присутствии добавки ПАВ, оптимизация предавтоклавной влажности и температуры сырца, обеспечение отвода конденсата и применение продувки совместно с вакуумированием позволяют снизить суммарные энергетические затраты на 20-25%.

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ВТОРИЧНЫХ ПРОДУКТОВ И ОТХОДОВ ПРОМЫШЛЕННОСТИ В ПРОИЗВОДСТВЕ ЯЧЕИСТЫХ БЕТОНОВ

Расширение сырьевой базы промышленности строительных материалов за счет вовлечения в производство вторичных продуктов и отходов промышленности имеет важное народнохозяйственное значение. В СССР ежегодно накапливается около 70 млн.т доменных шлаков, 20 млн.т шлаков цветной металлургии, 100 млн. т отходов от добычи угля и сланца, 80 млн.т золошлаковых отходов тепловых электростанций и др. При добыче нерудных строительных материалов в объеме 1 млрд.$м^3$ в год количество отходов достигает 180 млн. $м^3$, вскрышных пород - 330 млн.$м^3$ [54].

По данным Министерства финансов СССР, реальный экономический эффект от использования в промышленности строительных материалов в качестве сырья различных шлаков, топливных зол, белитовых шлаков, колчеданных огарков, фосфогипса и др. составляет более 1 млрд.руб. и обеспечивает ежегодную экономию около 3 млн.т топлива [54]. Не менее важно, что при этом достигается значительная экономия капитальных вложений на развитие материально-технической базы. По данным НИИЭС Госстроя СССР, использование 25-30 млн.т зол и шлаков тепловых электростанций в качестве сырья обеспечивает достижение экономического эффекта в размере около 400 млн.руб. Использование отходов позволяет сократить затраты на сооружение и содержание отвалов, которые составляют 1-1,5 руб/т шлаков и зол и до 5-7 руб/т для фосфогипса [54].

В структуре себестоимости ячеистобетонных изделий на долю сырьевых материалов приходится 30-40% затрат [52]. Это обусловливает высокую эффективность использования в качестве сырья различных попутных продуктов и отходов промышленности. Показателен опыт Эстонии, где с 1960 г. на основе пылевидной золы горючего сланца-кукерсита и кварцевого песка организовано производство автоклавных ячеистых бетонов. В настоящее время объем производства сланцезольного газобетона составляет более 350 тыс.$м^3$ в год. Из сланцезольного газобетона в республике построены теплые дома, школы, детские сады, поликлиники, животноводческие и птицеводческие фермы. Экономический эффект от производства и применения сланцезольного газобетона составил за период с 1960 г. по настоящее время около 16 млн.руб. [54].

Производство высококачественных газозолобетонных изделий организовано на Свердловском заводе ЖБИ им. Ленинского комсомола. На Кураховском заводе ЖБК за счет применения шлаков и зол себестоимость 1 $м^3$ ячеистого бетона снижена на 1,2 руб. Производство ячеистобетонных изделий с применением ваграночных шлаков организовано на Харьковском заводе

ЖБК № 3, что позволило на 10% сократить расход извести и цемента.

Замена цемента другими вяжущими позволяет снизить стоимость сырьевых материалов на 8-10% при использовании смешанного известково-цементного вяжущего, на 25% - известково-песчаного, на 30 - 50% - известково-цементно-шлакового, известково-зольного или известково-шлакового и до 80% при использовании сланцезольного. В странах СЭВ из общего объема утилизации золы-уноса и топливного шлака в производстве ячеистого бетона используется около 25-30%.

Однако, несмотря на высокую технико-экономическую эффективность, объем применяемых отходов при изготовлении ячеистых бетонов в настоящее время значительно ниже возможного. Связано это с целым рядом организационных и технологических трудностей. Основные технологические трудности широкого применения в производстве ячеистых бетонов различных отходов промышленности обусловлены непостоянством их химико-минералогического состава и отсутствием надежных рекомендаций по оперативной корректировке состава сырьевой смеси в зависимости от характеристик поступающего сырья. Несомненным успехом в этом плане следует считать разработанную под руководством П.И.Боженова методику расчета состава цементирующей связки автоклавных материалов по коэффициенту основности [2]. Коэффициент основности позволяет оценить химическую активность сырья, рассчитать основность силикатов и оценить с достаточной степенью точности содержание в сырье или в формируемом при автоклавной обработке силикатном камне алюминатов, ферритов и сульфатов кальция. На основе значений коэффициента основности П.И.Боженов предлагает следующую классификацию побочных продуктов [54]:

- $К_{осн}$ менее 0 - ультракислые;
- $К_{осн}$ от 0 до 0,8 - кислые (вяжущими свойствами не обладают, пригодны в качестве заполнителей и кислого компонента сырьевой смеси);
- $К_{осн}$ от 0,8 до 1,2 - нейтральные (вяжущие свойства выражены слабо, пригодны для автоклавной технологии, возможно использование в качестве заполнителей);
- $К_{осн}$ от 1,2 до 3,0 - основные (обладают вяжущими свойствами, пригодны в качестве основного компонента сырьевой смеси в производстве автоклавных материалов);

$К_{осн}$ более 3,0 - ультраосновные (известь и ее аналоги). Применение коэффициента основности в качестве обобщенной химической характеристи-

ки сырья открывает возможности расчета состава сырьевой смеси в производстве автоклавных материалов при использовании одного или нескольких видов отходов различного химического состава.

Новым направлением в технологии ячеистых бетонов, развиваемым НИИЖБом, является применение разработанного в Киевском ИСИ под руководством В.Д. Глуховского шлакощелочного вяжущего [55]. Компонентами шлакощелочного вяжущего являются молотые гранулированные доменные шлаки и щелочь, вводимая с водой затворения. Удельная поверхность молотого шлака 2500-4000 $см^2/г$ по ПСХ-2, расход щелочи 5-10% от массы шлака (в пересчете на сухое вещество). Особенность технологии ячеистого бетона на основе шлакощелочного вяжущего заключается в применении пены в качестве порообразователя. Это дает возможность управлять процессом формирования пористости и обеспечивает получение качественного материала [55] (табл. 6). Ячеистый бетон, получаемый по такой технологии, обладает высокими прочностными показателями. Это обусловлено высокой прочностью шлакощелочного вяжущего, составляющей, по данным В.Д.Глуховского, 80-120 МПа, что в 2 раза превышает прочность смешанного или известково-песчаного вяжущего.

Таблица 6

Объемная масса, $кг/м^3$	Прочность, МПа				МРЗ, циклы	Усадка, мм/м
	при сжатии	при изгибе	призменная	при растяжении		
200	0,45	0,18	–	–	–	–
250	0,65	0,25	–	–	–	–
300	1,5	0,52	–	–	–	–
400	2,4	0,6	–	–	–	–
500	5,9	1,1	4,6	0,6	75	0,55
600	7,1	1,4	5,7	0,8	100	0,71

Ячеистый бетон на шлакощелочном вяжущем характеризуется высокой атмосферостойкостью и стойкостью к агрессивным средам, что позволяет расширить области его применения.

Следует отметить, что в качестве щелочного компонента могут применяться различные промышленные отходы с содержанием R_2O не менее 75% [55].

По аналогичной технологии на основе отходов производства и применения тарного, технологического и оконного стекла в МИСИ получены ячеистые бетоны повышенной коррозионной стойкости, а при использовании вулканического стекла (перлита) получен жаростойкий ячеистый бетон огнеупорностью 1750°С. Стекловидная структура материала ввиду особенностей формирования сохраняет часть скрытой теплоты плавления, что увеличивает запас внутренней энергии. При определенных технологических воздействиях эта энергия высвобождается, снижая величину активационной энтальпии формирования стабильных кристаллических соединений из составляющих стекло химических элементов, что обеспечивает омоноличивание исходной системы. При этом суммарные энергетические затраты на подготовку сырьевых материалов и тепловлажностную обработку, связанные с получением единицы объема новообразований заданного химико-минералогического состава, меньше в 1,5-2 раза, чем в случае синтеза аналогичных новообразований из чистых окислов или использования исходных материалов с кристаллической структурой.

Синтез кристаллических новообразований протекает в основном через раствор. В результате процессом, лимитирующим кинетику формирования структуры цементирующего вещества и динамику роста прочности силикатного камня, является интенсивность гидролитической деструкции исходной структуры стекла. У различных структурных элементов стекол гидролитическая деструкция протекает с неодинаковой скоростью. В первую очередь происходит разрыв связей с высокой полярностью (типа Me–O) – процесс выщелачивания, затем связей Si – O – Si и лишь затем – ковалентных связей Al–O-Si. Эти процессы приводят к деполимеризации кремнекислородных тетраэдров структуры исходного стекла, что создает условия для синтеза гидросиликатных и гидроалюмосиликатных новообразований.

Увеличение содержания SiO_2 в исходном стекле повышает степень конденсации кремнекислородных тетраэдров и соответственно стойкость стекла к гидролитической деструкции. В связи с этим природные и техногенные стекла по показателям модулей основности и активности аналогично доменным шлакам подразделяются на основные, кислые и нейтральные. Ячеистые бетоны на базе кислых стекол наиболее целесообразно получать методом автоклавной обработки; в случае использования основных и нейтральных стекол допустима тепловлажностная обработка при нормальном давлении и температуре 90-100°С.

Исходная структура стекла разрушается тем полнее, чем выше концентрация в воде затворения гидроксильных и сульфат-ионов. Поэтому при производстве ячеистых бетонов на основе известково-шлаковых, шлакощелочных, стеклощелочных и стеклоизвестковых вяжущих целесообразно использовать для затворения растворы едких щелочей или солей щелочных металлов, а также добавку полуводного или двуводного гипса, расход которого зависит от вида вяжущего, температуры тепловлажностной обработки и дисперсности кремнеземистого компонента.

Применение сырьевых композиций на основе природных и техногенных стекол, гранулированных шлаков кислого и основного состава в комбинации с щелочным затворителем позволяет полностью исключить из производства цемент, повысить качество ячеистого бетона, прежде всего по показателям прочности, карбонизационной стойкости и морозостойкости, снизить себестоимость в среднем на I,5 руб/м^3 и получить ячеистые бетоны с требуемыми свойствами (кислотостойкие, жаростойкие). Все это предполагает эффективность реализации указанных разработок в промышленности.

Исследованиями ВНИИжелезобетона и ВИСИ показана возможность использования в производстве автоклавных ячеистых бетонов в качестве кремнеземистого компонента "хвостов" - отходов обогащения железных руд КМА [56]. Высокодисперсные отходы обогащения железистых кварцитов в виде водной суспензии (пульпы) имеют дисперсность I200-2500 см^2/г и содержат 65-75% кремнезема, что предопределяет целесообразность применения их в качестве кремнеземистого компонента в производстве автоклавных бетонов плотной и ячеистой структуры. На основе "хвостов" обогащения железных руд КМА в промышленных условиях Старооскольского завода СМС выпущена опытная партия ячеистобетонных изделий средней плотностью 300-800 кг/м^3, отвечающих по своим физико-техническим показателям нормативным требованиям [6]. Применение в качестве кремнеземистого компонента отходов обогащения железных руд позволяет сократить энергозатраты в производстве ячеистых бетонов на 50-60 кВт·ч/т.

Таким образом, широкое вовлечение в производство ячеистых бетонов вторичных продуктов и отходов промышленности дает возможность расширить сырьевую базу, снизить суммарные энергозатраты на единицу продукции, исключить из производства цемент, снизить себестоимость продукции и получить ячеистые бетоны с заданными свойствами. При этом в определенной мере решаются и вопросы охраны окружающей среды.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

I. Повышение эффективности производства и применения ячеистых бетонов обусловлено разработкой и реализацией технологических решений, обеспечивающих снижение средней плотности материала и энергоемкости технологического процесса при одновременном улучшении эксплуатационных показателей.

2. В производстве теплоизоляционного ячеистого бетона особое значение имеет снижение средней плотности до 200-250 кг/м^3, что может быть достигнуто применением способа трехстадийной поризации ячеистобетонной смеси, повышением дисперсности кремнеземистого компонента до 3000-4000 см^2/г, дисперсным армированием силикатной матрицы минеральными волокнами и совмещением способа тепловлажностной обработки и сушки изделий под давлением в автоклаве.

3. Повышение трещиностойкости ячеистобетонных изделий и конструкций в процессе производства и эксплуатации обеспечивается использованием сырьевых композиций на основе грубомолотого песка, формированием при автоклавной обработке рациональной структуры силикатного камня и цементирующих новообразований, регулированием режима высушивания изделий до равновесной влажности.

4. Снижение энергоемкости производства автоклавных ячеистых бетонов может быть достигнута уменьшением удельного расхода пара на автоклавную обработку за счет оптимизации влажности и температуры загружаемых в автоклав изделий, применением эффективных режимов автоклавирования с молярным переносом тепла, постоянным отводом конденсата и рекуперацией тепла, выносимого изделиями из автоклава, а также за счет сокращения энергозатрат на подготовку сырьевых материалов при совместном помоле компонентов и применении сырьевых композиций на основе грубомолотого песка.

5. Повышение эффективности производства автоклавных ячеистых бетонов достигается при применении различных промышленных отходов, что позволяет расширить сырьевую базу, исключить из производства цемент, а в отдельных случаях и известь, получить ячеистые бетоны с улучшенными эксплуатационными показателями и специальными свойствами (кислотостойкие и жаростойкие).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Воробьев Х.С. Совершенствование структуры производства стеновых строительных материалов. – Строительные материалы, 1981, № 7.

2. Боженов П.И. Технология автоклавных материалов. – Л.: Стройиздат, 1978.

3. Состояние производства ячеистых бетонов в ЧССР и пути его развития. – Stavivo, 1976, № 9, 280–284 (ЧССР).

4. Меркин А.П., Зейфман М.И., Евтушенко И.С., и др. "Сухая" технология изготовления ячеистых бетонов на Губкинском заводе. – Пром-сть автоклав.материалов и местных вяжущих. Сер.8: Реф. инф. ВНИИЭСМ, 1976, вып.10.

5. Домбровский А.В. и др. Технологические особенности и перспективы сухого совместного помола компонентов смеси для изготовления ячеистобетонных изделий. – В кн.: Производство и применение силикатных бетонов. – Таллин: 1978. (Труды НИПИсиликатобетона).

6. Чернышов Е.М., Мысков В.В. Энергосберегающие технологические решения в производстве силикатных автоклавных материалов.– Пром-сть автоклав. материалов и местных вяжущих. Сер.8: Реф.инф.ВНИИЭСМ, 1981, вып.8.

7. Меркин А.П., Зейфман М.И. Основные направления экономии топливно-энергетических ресурсов в технологии ячеистых бетонов. – В кн.: Повышение эффективности производства и применение индустриальных изделий из ячеистого бетона в народном хозяйстве. – К.: НИИСМИ, 1980.

8. Краснова Г.В., Кривицкий М.Я., Макаричев В.В. Современное производство и применение ячеистых бетонов. – Пром-сть автоклав.материалов и местных вяжущих. Сер.8: Обзор. инф. ВНИИЭСМ, 1981.

9. Меркин А.П., Зейфман М.И. Способ изготовления ячеистых бетонов с применением пара пониженного давления. – Пром-сть автоклав. материалов и местных вяжущих. Сер.8: Реф.инф.ВНИИЭСМ, 1977, вып.2.

10. Эвинг П.В. О работе предприятий по производству изделий из автоклавных бетонов. Там же, 1981, вып.2.

11. Сычев М.М. Методы интенсификации гидротермальных процессов в производстве строительных материалов. – Строительные материалы, 1981, № 8.

12. Федин А.А., Зуев Б.М., Уколова А.В. Совершенствование технологии ячеистобетонных изделий для гражданского строительства. – В кн.: Повышение эффективности производства и применение индустриальных изделий из ячеистого бетона в народном хозяйстве. К.: НИИСМИ, 1980.

13. Тезисы докладов Всесоюзного семинара "Гидросиликаты кальция и их применение". – Каунас: Каунасский политехнический институт, 1980.

14. А.с. ЧССР, МДТ, 666965 /С04 В 13/10/ № 168434.

15. Меркин А.П., Зейфман М.И. Оптимальная гранулометрия песка конструкционных ячеистых бетонов. – Бетон и железобетон, 1981, № 12.

16. Чернышов Е.М., Баранов А.Т., Крохин А.М. Повышение качества ячеистых бетонов путем улучшения их структуры. – Бетон и железобетон, 1977, № 1.

17. Кривицкий М.Я., Макаричев В.В., Миронов В.С., Подлесных В.А. А.с. СССР, кл.С04В 27/02,№ 567701 от 24.08.77. – БИ, 1977, № 29.

18. Заявка ФРГ, кл. С04 В 15/02, № 2423395, опубл.27.11.75.

19. Удачкин И.Б., Гонтарь Ю.В. Эффективные способы повышения водозащитных свойств ячеистого бетона. – Пром-сть автоклав. материалов и местных вяжущих. Сер.8: Обзор.инф. ВНИИЭСМ, 1980.

20. Безрукова Т.Ф. Трещиностойкий ячеистый бетон. – Пром-сть автоклав.материалов и местных вяжущих. Сер.8: Реф.инф.ВНИИЭСМ, 1981, вып.7.

21. Кривицкий М.Я., Миронов В.С., Вязьменова В.А. Ячеистый бетонополимер. – Там же, 1976, вып.3.

22. Эскуссон К., Острат Л., Грюнер Г., Эвинг П.В. Пути повышения качества ячеистых бетонов. – Пром-сть автоклав.материалов и местных вяжущих. Сер.8: Реф.инф. ВНИИЭСМ, 1978, вып.7.

23. Армированные волокном силикатные теплоизоляционные материалы.– Stavivo, 1977, 55, № 12 (ЧССР).

24. Ухова Т.А., Кривицкая И.Г. Опыт применения комплексных добавок на основе суперпластификаторов при производстве ячеистых бетонов. – В кн.: Тезисы докладов IУ Республиканской конференции "Долговечность конструкций из автоклавных бетонов", ч.1. – Таллин: НИИ строительства Госстроя ЭССР, 1981.

25. Калашников В.И., Кузнецов Ю.С., Макридин Н.И. Использование химических добавок с учетом технологических особенностей производства газобетона. Там же.

26. Горяйнов К.Э., Атрачев Б.О., Назарова Т.Н. Совершенствование виброформования крупноразмерных массивов из ячеистого бетона. – Строительные материалы, 1978, № 8.

38. Методические рекомендации по изготовлению высокоэффективного теплоизоляционного ячеистого бетона автоклавного твердения с объемной массой 200 кг/м^3. – К.: НИИСМИ, 1979.

39. Руководство по технологии изготовления ячеистого бетона объемной массой 250–300 кг/м^3. – М.: НИИЖБ, 1977.

40. К л у п ш а с К.В., Б и х о в с к и с А.Э. Перспективные направления развития производства изделий из теплоизоляционного ячеистого бетона. – В кн.: Повышение эффективности производства и применение индустриальных изделий из ячеистого бетона в народном хозяйстве. – К.: НИИСМИ, 1980.

41. Р о й з м а н П.А., Г о р я ч и к о в Г.Ш. Заводская технология производства ячеистого бетона объемной массой 300 кг/м^3. – Пром-сть автоклав.материалов и местных вяжущих. Сер.8: Реф.инф.ВНИИЭСМ,1977,вып.2.

42. М е р к и н А.П., З е й ф м а н М.И., С а р д а р о в Б.С. Влияние технологических факторов на структуру цементирующего вещества и свойства ячеистого бетона на смешанном вяжущем. – Строительные материалы, 1978, № 2.

43. М е р к и н А.П., Г о р л о в Ю.П., З е й ф м а н М.И. Повышение трещиностойкости ячеистого бетона за счет формирования рациональной структуры силикатного камня. – В кн.: Тезисы докладов Ш Республиканской конференции "Долговечность конструкций из автоклавных бетонов". – Таллин: НИИ строительства Госстроя ЭССР, 1978.

44. С а х а р о в Г.П., П о п о в К.И., Б а т а е в С.С. Повышение стойкости ячеистого бетона на грубомолотом песке при кратковременном и длительном нагружении. – Там же.

45. М е р к и н А.П., З е й ф м а н М.И., И м и л ь Л.А. и др. Ячеистобетонная смесь. А.с. СССР № 833748, кл. С04 В 15/02. БИ,1981,№ 20.

46. М е р к и н А.П., П е р е г у д о в В.В., З е й ф м а н М.И. Возможности снижения расхода пара при автоклавной обработке ячеистых бетонов. – Строительные материалы, 1980, № 3.

47. М е р к и н А.П., З е й ф м а н М.И., У д а ч к и н И.Б. и др. Способ автоклавной обработки ячеистобетонных изделий. А.с. СССР № 806656, кл.С04 В. – БИ, 1981, № 7.

48. Автоклавный ячеистый бетон (пер. с англ.). – М.: Стройиздат, 1981.

49. К а у ф м а н Б.Н. Теплопроводность строительных материалов.– М.: Госстройиздат, 1951.

50. Указания по отделке наружных поверхностей изделий из ячеистых бетонов цементными красками. – М.: Госстройиздат, 1960.

27. К р а с н о в а Г.В. Производство и применение в строительстве автоклавных ячеистых бетонов. – Пром-сть автоклав.материалов и местных вяжущих. Сер. 8: Реф.инф. ВНИИЭСМ, 1981, вып.11.

28. Д о м б р о в с к и й А.В., С а ж н е в Н.П. Производство изделий из ячеистых бетонов с применением ударной площадки. – Там же, 1979, вып.11.

29. К р и в и ц к и й М.Я., А к и м о в а А.П., Ч е х н и й В.П. и др. Взрывобезопасный пастообразный газообразователь для заводов ячеистого бетона. – Сб.трудов НИИЖБ, 1977, вып.26.

30. В а г и н а Л.Ф., Г р о м о в С.А., Ш а р а п о в В.М. Взрывобезопасная паста из вторичного алюминия для изготовления ячеистых бетонов. – Пром-сть автоклав.материалов и местных вяжущих. Сер. 8: Реф. инф. ВНИИЭСМ, 1977, вып.1.

31. У д а ч к и н И.Б., Д р а г о м и р е ц к а я Л.А., С о л о д о в н и к А.Б. и др. Регулирование напряженно-деформированного состояния вспучивающейся ячеистобетонной смеси. – В кн.: Повышение эффективности производства и применение индустриальных изделий из ячеистого бетона в народном хозяйстве. – К.: НИИСМИ, 1980.

32. Д р а г о м и р е ц к а я Л.А., Ч е р н я в с к и й П.Н. Влияние комплексного газообразователя на структуру и морозостойкость ячеистого бетона. – В кн.: Тезисы докладов IУ Республиканской конференции "Долговечность конструкций из автоклавных бетонов", ч. 1.–Таллин: НИИстроительства Госстроя ЭССР, 1981.

33. М е р к и н А.П., М и р е ц к и й Ю.И., Г а д ж и л ы Р.А. Предварительная поризация массы в технологии теплоизоляционных материалов. – В кн.: Ячеистые бетоны, вып.1.–Л.: Стройиздат, 1968.

34. М е р к и н А.П., З е й ф м а н М.И., Ф и л а т о в А.П. Трехстадийная поризация ячеистобетонной смеси в производстве теплоизоляционного ячеистого бетона. – Пром-сть автоклав.материалов и местных вяжущих. Сер.8: Реф.инф.ВНИИЭСМ, 1980, вып.4.

35. Пат.Японии № 52-84374, кл.С04 В 21/02, опубл.4.11.80.

36. М е р к и н А.П., З е й ф м а н М.И., У д а ч к и н И.Б. и др. Способ приготовления ячеистобетонной смеси. А.с. № 688470, кл. С04 В 15/02, БИ, 1979, № 36.

37. М е р к и н А.П., З е й ф м а н М.И., У д а ч к и н И.Б. и др. Снижение энергоемкости производства и повышение качества ячеистобетонных панелей при использовании песка композиционного состава. – Строительные материалы, 1981, № 3.

51. Макаричев В.В., Кривицкий М.Я., Вирганская Н.О. Энергоемкость производства изделий из автоклавных ячеистых бетонов. - Пром-сть автоклав.материалов и местных вяжущих. Сер.8: Реф.инф. ВНИИЭСМ, 1980, вып.4.

52. Вирганская Н.О., Доморовский А.В., Кривицкий М.Я. Повышение технико-экономической эффективности производства изделий из ячеистого бетона. - Пром-сть автоклав.материалов и местных вяжущих. Сер.8: Обзор.инф. ВНИИЭСМ, 1977.

53. Филатова Р.П., Меркин А.П. Оптимизация параметров автоклавной обработки ячеистобетонных изделий. - Пром-сть автоклав. материалов и местных вяжущих. Сер.8: Реф.инф. ВНИИЭСМ, 1981, вып.6.

54. Материалы Всесоюзного совещания "Использование вторичных продуктов и отходов промышленности в производстве автоклавных строительных материалов и создание безотходных технологических процессов". - М.: ВНИИстром, 1981.

55. Баранов А.Т., Багров Б.О. Ячеистый бетон на шлакощелочном вяжущем. - Пром-сть автоклав.материалов и местных вяжущих. Сер.8: Реф.инф. ВНИИЭСМ, 1977, вып.1.

56. Инструкция по технологии изготовления изделий из ячеистых бетонов на основе тонкодисперсных побочных продуктов обогащения железных руд Курской магнитной аномалии. - М.: ВНИИжелезобетон, 1980.

СОДЕРЖАНИЕ